

УДК 624.075.23

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОРОТКИХ ТРУБОБЕТОННЫХ
КОЛОНН КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ**

**BEARING CAPACITY OF SHORT CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS
OF CIRCULAR CROSS-SECTION**

А.Л. КРИШАН, В.И. РИМШИН, В.А. РАХМАНОВ, Е.А. ТРОШКИНА, В. Л. КУРБАТОВ
A.L. KRISHAN, V.I. RIMSHIN, V.A. RAKHMANOV, E.A. TROSHKINA, V.L. KURBATOV

**(Магнитогорский государственный технический университет,
Московский государственный строительный университет,
Северо-Кавказский филиал Белгородского
государственного технического университета им. В.Г. Шухова,
Научно-исследовательский проектно-конструкторский
и технологический институт ВНИИЖелезобетон)
(Magnitogorsk State Technical University,
Moscow State University of Civil Engineering,
North-Caucasian Branch of Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov,
Research Engineering and Technological Institute VNIzhbeton)**
E-mail: kris_al@mail.ru; v.rimshin@vniizhbeton.ru; l.kuzmina@plehanova7.ru;
skyjanny@mail.ru; kurbatov_bgtu@list.ru

Предложена методика определения несущей способности коротких трубобетонных колонн круглого поперечного сечения. Методика построена на базе деформационной модели железобетона и позволяет учитывать сложное напряженное состояние бетонного ядра и стальной оболочки. Она приемлема для трубобетонных колонн, изготовленных по разным технологиям из бетонов различной прочности и вида.

The method for determination the bearing capacity of short concrete filled steel tube columns of circular cross-section is offered. The calculation procedure is based on the nonlinear deformation model of reinforced concrete and takes into account the complex stress of the concrete core and steel shell. The technique is acceptable for concrete filled steel tube columns, made by different techniques of concrete with different strength and appearance.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, несущая способность, объемное напряженное состояние, нелинейная деформационная модель.

Keywords: concrete filled steel tube columns, bearing capacity, triaxial stress state, nonlinear deformation model.

Государственными программами, направленными на развитие текстильной промышленности, предусмотрено строительство новых, а также реконструкция существующих заводов и предприятий. Технологические процессы предусматривают увеличение пролетов на промышленных предприятиях, а также в связи с этим проведение научных исследований и проектных решений строительных конструкций, имеющих повышенную несущую способность по сравнению с действующими аналогами. Трубобетонные конструкции находят широкое применение при проектировании предприятий текстильной промышленности в нашей стране и за рубежом, поэтому научные исследования в данной области являются актуальными и важными.

Трубобетонная колонна представляет собой стальную трубу, заполненную бетоном. Задачу определения несущей способности сжатых трубобетонных элементов можно отнести к сложной проблеме оценки силового сопротивления композитной конструкции. Основная сложность здесь заключается в необходимости учета объемного напряженно-деформированного состояния и совместной работы бетонного ядра и стальной оболочки [1...9].

В связи с особенностями напряженно-деформированного состояния системы бетонное ядро – стальная оболочка, которое в

процессе нагружения сжатого трубобетонного элемента в зависимости от соотношения коэффициентов поперечных деформаций бетона ν_b и стали ν_s меняется не только количественно, но и качественно [10], аналитическое описание определяющих соотношений и процесса перераспределения усилий между компонентами этой системы сталкивается с определенными трудностями [11]. С учетом характера армирования таких колонн этот расчет рекомендуется выполнять на основе нелинейной деформационной модели [12].

Одним из существенных преимуществ нелинейной деформационной модели является единый системный подход к определению несущей способности и напряженно-деформированного состояния сжатых коротких и гибких трубобетонных элементов на всех стадиях их работы под центральной и внецентренно приложенной кратковременной и длительной нагрузками. Практическая реализация данной модели осуществляется с помощью итерационного расчета, выполняемого с учетом неупругих деформаций материалов и изменения коэффициентов поперечных деформаций бетона и стали по мере роста уровня напряжений.

Базой для создания расчетных зависимостей в принятой модели являются определяющие соотношения между напряжениями и деформациями для бетона и стали. Для трубобетонных колонн предлагается расчет

несущей способности сжатых трубобетонных элементов проводить в два этапа.

На первом этапе для осевого направления колонн расчетным путем строятся диаграммы деформирования бетонного ядра и стальной оболочки. Для этого выполняется расчет прочности нормального сечения короткой $\lambda_{\text{eff}} \leq 12$ центрально сжатой трубобетонной колонны. На втором этапе с помощью известных зависимостей нелинейной деформационной модели осуществляется расчет несущей способности внецентренно сжатой колонны.

Наиболее важной задачей при построении диаграмм деформирования бетонного ядра и стальной оболочки является определение координат их параметрических точек. Для объемно-напряженной стальной оболочки используется гипотеза единой кривой А.А. Ильюшина [13]. При этом связь между интенсивностью текущих напряжений и интенсивностью относительных деформаций принимается в виде диаграммы Прандтля.

Для сжатого бетонного ядра диаграмму деформирования рекомендуется принимать криволинейной. Здесь основной параметрической точкой является вершина диаграммы. Максимальное напряжение осевого направления σ_{bz} соответствует его прочности при трехосном сжатии R_{b3} , а соответствующая относительная деформация обозначена ε_{b00} .

Всесторонний анализ литературы, выполненный в работе [14], свидетельствует о том, что подавляющая часть исследователей для нахождения прочности объемно напряженного бетонного ядра R_{b3} при равномерном боковом обжатии напряжениями $|\sigma_{br}| < |\sigma_{bz}|$ использует широко известную формулу:

$$R_{b3} = R_b + k\sigma_{br}, \quad (1)$$

$$R_{b3} = R_b \left[1 + \left(0,25\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma}-2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}-2}{4}\right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right], \quad (3)$$

в которой R_b – прочность бетона при осевом сжатии; σ_{br} – боковое давление на бетон со стороны стальной оболочки; k – коэффициент бокового давления.

Величину коэффициента k в этой формуле обычно принимают постоянной ($k=4,1$ или $k=4,0$). В настоящее время доказано [15], что значение k переменное и в основном зависит от уровня бокового обжатия и вида бетона. Нашими исследованиями [16], [17] выявлено, что для бетонного ядра трубобетонных колонн коэффициент k меняется в достаточно широком диапазоне (от 2,5 до 7).

Часто используемая в последнее время формула Дж. Мандера [18] в данном случае не может быть применена, так как она предполагает известную величину σ_{br} . Однако для сжатых трубобетонных элементов величина бокового давления на бетонное ядро в предельном состоянии зависит от геометрических и конструктивных параметров рассчитываемой конструкции.

Для решения поставленной задачи примем теоретически обоснованное предложение [15] по определению коэффициента бокового давления k практически для любых каменных материалов через относительный уровень их бокового обжатия $m = \sigma_{br}/R_{b3}$:

$$k = \frac{1 - a - am}{b + (f - b)m}, \quad (2)$$

где a, b – коэффициенты материала, устанавливаемые на основании опытов, причем $a = 0,5b$; f – параметр, определяющий характер поверхности прочности в области всестороннего равномерного сжатия (для плотного бетона поверхность прочности разомкнута и $f=1$).

Подставив выражение (2) в формулу (1) и выполнив некоторые преобразования, получим:

где $\bar{\sigma}$ – относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии $\bar{\sigma} = \sigma_{br}/R_b$.

В нагруженной трубобетонной колонне боковое давление оказывает существенное влияние не только на прочность бетонного ядра, но и на величину напряжения осевого направления в стальной оболочке σ_{pz} . В предельной стадии центрально сжатой колонны это напряжение также выразим через $\bar{\sigma}$. Для этого используем условие текучести Генки-Мизеса.

Так как для изготовления реальных колонн обычно используют тонкие трубы (с отношением толщины стенки δ к диаметру сечения $\delta/d \leq 0,025$), стальную оболочку центрально сжатой трубобетонной конструкции приближенно можно рассматривать, как работающую в условиях плоского напряженного состояния "сжатие-растяжение". Для такого напряженного состояния справедлива формула:

$$\sigma_{pz} = \sqrt{\sigma_y^2 - 0,75\sigma_{pt}^2} - 0,5\sigma_{pt}, \quad (4)$$

где σ_y – предел текучести стали внешней оболочки; σ_{pt} – напряжение окружного направления стальной трубы в предельном состоянии.

$$N = 0,25R_b A \left(\sqrt{(\bar{\sigma} - 2)^2 + 16\bar{\sigma}/b} - (\bar{\sigma} - 2) + 4\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} \right). \quad (8)$$

Замечаем, что при фиксированных значениях геометрических и конструктивных параметров колонн (R_b, σ_y, A, A_p, b) суммарная продольная сила, воспринимаемая бетоном и сталью в нормальном сечении, зависит только от относительного бокового давления $\bar{\sigma}$. Максимальному значению продольной силы соответствует условие:

$$\frac{dN}{d\bar{\sigma}} = 0. \quad (9)$$

Осредненные по толщине тангенциальные напряжения в стальной оболочке для тонкостенных труб можно с достаточной для практических расчетов точностью выразить через боковое давление с помощью зависимости:

$$\sigma_{pt} = -2\sigma_{br} \frac{A}{A_p}, \quad (5)$$

в которой A и A_p – площади поперечных сечений бетонного ядра и стальной оболочки.

Далее используем понятие конструктивного коэффициента трубобетона ρ , вычисляемого по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_y A_p}{R_b A}. \quad (6)$$

С учетом зависимостей (4)...(6) напряжение в стальной оболочке σ_{pz} можно найти по формуле:

$$\sigma_{pz} = R_b \left(\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}. \quad (7)$$

Прочность короткой центрально сжатой трубобетонной колонны может быть найдена как сумма усилий, воспринимаемых бетонным ядром и стальной оболочкой, по формуле:

После решения этого уравнения получаем формулу для определения $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = 0,48e^{-(a+b)} \rho^{0,8}. \quad (10)$$

Формула для вычисления относительной деформации сжатия бетонного ядра ϵ_{b00} в вершине диаграммы деформирования получена в работе [19] с учетом данных исследований [20] и имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \left(1 + 0,5\rho^{0,5}\right) \frac{R_{b3}}{R_b}, \quad (11)$$

где ε_{b0} – предельная величина относительной деформации бетона при осевом сжатии.

Предельная относительная деформация укорочения стальной оболочки в сжатой зоне с учетом совместности деформирования с бетоном принимается $\varepsilon_{p2} = \varepsilon_{b00}$.

Таким образом, для определения координат искомых параметрических точек диаграмм деформирования бетонного ядра " $\sigma_{bz}-\varepsilon_{bz}$ " и стальной оболочки " $\sigma_{pz}-\varepsilon_{pz}$ " получены необходимые зависимости.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика расчета несущей способности внецентренно сжатой композитной конструкции – трубобетонной колонны – основана на использовании нелинейной деформационной модели, учитывает объемное напряженно-деформированное состояние и совместную работу бетонного ядра и стальной оболочки. Важное преимущество этой методики перед известными состоит в возможности учитывать влияние на уровень бокового давления бетона на стальную оболочку и прочность объемно сжатого бетонного ядра структурных особенностей исходного бетона. Отмеченные научные и проектные предложения могут быть использованы при строительстве и реконструкции зданий и сооружений в текстильной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невсетаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона // *Фундаментальные науки*. – 2011, № 12. С. 580...583.
2. Alacali S.N., Akbas B., Dorana B. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation // *Journal Applied Soft Computing*. – № 11, 2010. P. 2645...2655.
3. Choi E., Park S.-H., Cho B.-S., Hui D. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns // *Journal of Alloys and Compounds*. – 577S. 2013. P. 756...759.
4. Leon R.T., Kim D.K., Hajjar J.F. Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns. Part I: Formulation of Design Provisions for the 2005 AISC

Specification // *Engineering Journal / Fourth Quarter*. – 2007. P.341...358.

5. Naeef M., Bali M., Naeef M.R. and Amir J.V. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5' Machine Learning Method // *Journal of Civil Engineering*. – №17(7), 2013. P. 1714...1719.

6. Masoudnia R., Amiri S., WanBadaruzzaman W.H. An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill (part I) // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – №5, 2011. P.1715...1721.

7. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. 2010: Concrete filled steel tube, Poltava: TOV ACMI.

8. Yu T., Teng J.G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns with a square outer tube and a circular inner tube subjected to axial compression // *Journal of Composites for Construction*. – Vol. 17, 2013. P. 271...279.

9. Zohrevand P., Mirmiran A. Seismic Response of Ultra-High Performance Concrete- Filled FRP Tube Columns // *Journal of Earthquake Engineering, Taylor and Francis*. – Vol 17, № 1, 2013. P. 155...170.

10. Кришан А.Л., Заикин А.И. Расчет прочности трубобетонных колонн // *Бетон и железобетон*. – 2011, № 3. С.17...19.

11. Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов // *Бетон и железобетон*. – 2008, № 2. С.22...25.

12. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Паловина С.Н. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013.

13. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948.

14. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects: A dissertation doctor of philosophy. – Kansas, USA: Kansas State University, 2012.

15. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996.

16. Krishan A.L., Troshkina E.A. Estimation of carrying capacity of eccentrically compressed concrete-filled steel tube columns // *Electronic magazine "Advances of Environmental Biology"*. Vol. 8, № 6, May 2014. P. 1974...1977 [http:// www.aensiweb.com/aebonline.html](http://www.aensiweb.com/aebonline.html).

17. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*. – 114 (8), 1988. P.1804...1826.

18. Кришан А.Л., Сабиров П.П., Суворцов М.М. Трубобетонные колонны круглого, кольцевого и квадратного поперечного сечения. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014.

19. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-

JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Japan, 2002.

20. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Наркевич М.Ю. Определение деформационных характеристик бетона // Естественные и технические науки. – 2014, № 9-10 (77). С. 367...369.

REFERENCES

1. Nesvetaev G.V., Rezvan I.V. Ocenka prochnosti trubobetona // Fundamental'nye nauki. – 2011, № 12. S.580...583.

2. Alacali S.N., Akbas B., Dorana B. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation // Journal Applied Soft Computing. – № 11, 2010. P. 2645...2655.

3. Choi E., Park S.-H., Cho B.-S., Hui D. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns // Journal of Alloys and Compounds. – 577S. 2013. P. 756...759.

4. Leon R.T., Kim D.K., Hajjar J.F. Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns. Part 1: Formulation of Design Provisions for the 2005 AISC Specification // Engineering Journal / Fourth Quarter. – 2007. P.341...358.

5. Naej M., Bali M., Naej M.R. and Amir J.V. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5' Machine Learning Method // Journal of Civil Engineering. – №17(7), 2013. P. 1714...1719.

6. Masoudnia R., Amiri S., WanBadaruzzaman W.H. An Analytical model of short steel box columns with concrete infill (part I) // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – №5, 2011. R.1715...1721.

7. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. 2010: Concrete filled steel tube, Poltava: TOV ASMI.

8. Yu T., Teng J.G. Behavior of hybrid FRP-concrete steel double-skin tubular columns with a square outer tube and a circular inner tube subjected to axial compression // Journal of Composites for Construction. – Vol. 17, 2013. R. 271...279.

9. Zohrevand P., Mirmiran A. Seismic Response of Ultra-High Performance Concrete- Filled FRP Tube Columns // Journal of Earthquake Engineering, Taylor and Francis. – Vol 17, № 1, 2013. P. 155...170.

10. Krishan A.L., Zaikin A.I. Raschet prochnosti trubobetonnnyh kolonn // Beton i zhelezobeton. – 2011, № 3. S.17...19.

11. Krishan A.L., Zaikin A.I., Kupfer M.S. Opre-delenie razrushajushhej nagruzki szhatyh trubobetonnnyh jelementov // Beton i zhelezobeton. – 2008, № 2. S.22...25.

12. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Petrov A.N., Paljuvina S.N. Model' deformirovaniya zhelezobetona v prirashhenijah i raschet balok-stenok i izgibaemyh plit s treshhinami. – Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2013.

13. Il'jushin A.A. Plastichnost'. – M.: Gostehizdat, 1948.

14. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects: A dissertation doctor of philosophy. – Kansas, USA: Kansas State University, 2012.

15. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona. – M.: Strojizdat, 1996.

16. Krishan A.L., Troshkina E.A. Estimation of carrying capacity of eccentrically compressed concrete-filled steel tube columns // Electronic magazine "Advances of Environmental Biology". Vol. 8, № 6, May 2014. P. 1974...1977 [http:// www.aensiweb.com/aebonline.html](http://www.aensiweb.com/aebonline.html).

17. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE. – 114 (8), 1988. P.1804...1826.

18. Krishan A.L., Sabirov R.R., Surovcov M.M. Trubobetonnnye kolonny kruglogo, kol'cevogo i kvadratnogo poperechnogo sechenija. – Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tehn. un-ta im. G.I.Nosova, 2014.

19. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Japan, 2002.

20. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astaf'eva M.A., Narkevich M.Ju. Opre-delenie deformacionnyh harakteristik betona // Estestvennye i tehnicheckie nauki. – 2014, № 9-10 (77). S. 367...369.

Рекомендована кафедрой проектирования зданий и строительных конструкций Магнитогорского гос. техн. ун-та. Поступила 21.11.16.